

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta Elektroniky a Informatiky

Jednopolové poruchy v síti vn a nn
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jednopolové poruchy v síti vn a nn

Single phase faults in LV and MV networks

Ondřej Prus

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký

Ostrava, 2021

Abstrakt

V první část bakalářské práce se autor věnuje parametrům venkovního a kabelového vedení vn a nn sítí. Jedná se o elektrické veličiny ovlivňující vlastnosti vedení, jež jsou dány použitým materiálem, konstrukcí vedení, průřezem vodičů a okolním prostředím vodičů. Druhá část pojednává o jednotlivých jednopólových poruchových stavech. Třetí část je věnována kompenzaci zemních kapacitních proudů při jednopólových poruchách. Čtvrtá a poslední teoretická část se zabývá lokalizací místa poruchy. Následuje část praktická, ve které je počítán poruchový proud při zemním spojení a při jednofázovém zkratu.

Klíčová slova

Zkraty, zemní spojení, lokalizace místa zemního spojení, kompenzace zemních kapacitních proudů.

Abstract

In the first part of the bachelor thesis the author is focusing on the parameters of outdoor line and cable line of HV and LV networks. These parameters are electrical variables affecting the properties of the line, and are established by the material, construction of the line, cross-section of conductors and surroundings of the line. The second part deal with individual single-pole fault states. The third part is dedicated for compensation of ground capacitive currents during single-pole faults. The fourth and last theoretical part is dealing with localization of the fault. The practical part follows, in which the fault current of a ground fault and a single-phase short circuit is calculated.

Keywords

Short-circuit, ground fault, localization of the fault, compensation of ground capacitive current.

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za poskytnuté cenné rady, připomínky a vedení bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	7
Seznam použitých obrázků	8
Seznam tabulek	8
1. Úvod	9
2. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn	10
2.1 Venkovních vedení	10
2.1.1 Parametry venkovního vedení	10
2.1.2 Konstrukčně můžeme vedení řešit různými metodami:	10
2.1.3 Elektrické parametry venkovního vedení	11
2.1.3.1 Rezistance	11
2.1.3.2 Indukčnost	13
2.1.3.3 Kapacita	15
2.2 Kabelové vedení	17
2.2.1 Elektrické parametry kabelového vedení:	17
2.2.1.1 Podélná impedance kabelového vedení	17
2.2.1.2 Příčná admitance kabelového vedení	17
2.2.1.3 Kapacita kabelového vedení	17
3. Teoretický rozbor vzniku jednopólových poruch	20
3.1 Zkraty	20
3.1.1 Rozdělení zkratů	20
3.1.1.1 Souměrný zkrat	20
3.1.1.2 Nesouměrný zkra	20
3.2 Zemní spojení	21
4. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů	23
4.1 Kompenzace sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku	23
4.2 Kompenzace sítě uzemněné přes rezistor	24
5. Možnost lokalizace místa zemního spojení	26
5.1 Statické metody	26
5.1.1 Metody využívané pro izolované distribuční soustavy	26
5.1.2 Metody vhodné pro kompenzované distribuční soustavy	27
5.2 Dynamické metody	29
5.3 Lokalizace poruchy v sítích uzemněných přes odporník	32
5.4 Lokalizace postižených vývodů	33

6.	Výpočet.....	34
6.1	Zemní spojení v kabelové síti	34
6.2	Jednofázový zkrat	35
7.	Závěr.....	39
	Literatura	40

Seznam použitých symbolů a značek

Al	Chemická značka hliníku
Cu	chemická značka mědi
Fe	chemická značka železa
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Průřez kombinovaným lanem AlFe [9]	11
Obr. 2: Závěsný kabel [10]	11
Obr. 3: Dvojvodičové vedení [12]	13
Obr. 4: Průběh třífázového proudu	14
Obr. 5: Nesymetrické třífázové vedení bez uvažování země (vlevo) a s uvažováním země (vpravo) [7]	16
Obr. 6: Kapacity stíněných a trojplášťových kabelů [1]	18
Obr. 7: Kapacity kabelů se společným pláštěm [1]	18
Obr. 8: Trojfázový zkrat [7]	20
Obr. 9: Trojfázový zemní zkrat [7]	20
Obr. 10: Dvojfázový zkrat [7]	20
Obr. 11: Dvofázový zemní zkrat [7]	21
Obr. 12: Jednofázový zkrat [7]	21
Obr. 13: Zemní spojení v síti s izolovaným uzlem [6]	21
Obr. 14: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení [6]	22
Obr. 15: Znázornění vlivu tlumivky [6]	23
Obr. 16: Fázorový diagram kompenzace zemního proudu tlumivkou [6]	24
Obr. 17: Vliv činného odporu v uzlu trojfázové síti [6]	24
Obr. 18: Fázorový diagram kompenzace zemního proudu odporem [6]	25
Obr. 19: Příklad Charakteristiky Wattmetrického článku [3]	27
Obr. 20: Způsob funkce admitanční metody [3]	28
Obr. 21: Příklad pracovní charakteristiky admitanční metody [3]	29
Obr. 22: Osciloskopický průběh netočivých složek napětí a proudu nepoškozeného vývodu [3]	30
Obr. 23: Osciloskopický průběh netočivých složek napětí a proudu poškozeného vývodu [3]	30
Obr. 24: Příklad qu-diagramu tří vývodů v případě nízkoodporové poruchy na vývodu qoA (qoB a qoC nepostižené) [3]	31
Obr. 25: Lokalizace místa poruchy za použití indikátorů zkratového proudu [3]	32
Obr. 26: Správná a chybná instalace měřicího transformátoru proudu na kabelové vedení [3]	32
Obr. 27: Indikátor poruchy venkovního vedení [3]	33
Obr. 28: Schéma řešené sítě	35
Obr. 29: Náhradní schéma sousledné a zpětné složky	36

Seznam tabulek

Tab. 1: Rezistivita vodičů při 20 °C [1]	12
Tab. 2: Teplotní činitelé odporu [1]	12
Tab. 3: Katalogová data použitého kabelu [8]	34

1. Úvod

Elektrizační soustava je tvořena výrobou elektrické energie, přenosem a rozvodem k místům spotřeby. Základními členy přenosové soustavy jsou elektrické stanice, které zajišťují transformaci napětí na jednotlivé hladiny a rozdělovat dodávku do jednotlivých úrovní. V ČR se považuje za vvn považuje napětí od 52 kV výše. Napěťové hladiny používané pro přenosové sítě jsou 400 kV, 220 kV a částečně i 110 kV.

Na hladinách vysokého napětí (vn) a nízkého napětí (nn) pracují distribuční sítě. Tyto sítě dodávají elektrickou energii do domácností, výrobních podniků atd. V ČR se hladiny pro vn používají napětí 1000 V (1kV) až 52 kV a pro nn se používají hladiny 50 V až 1000 V. Hladiny 35 kV a 22 kV jsou nejpoužívanější co je vn distribuce týče. Ne tak často se mohou používat hladiny 10 kV a 6 kV. Pro nn distribuci se nejčastěji používá 230/400 V.

Během provozu elektrizačních soustav mohou nastat mnohé poruchy, jež mohou zapříčinit zničení připojených zařízení, případně v horších případech mohou způsobit zranění či dokonce smrt. Mezi nejčastější poruchy patří zemní spojení, zkrat nebo přepětí. Příčiny mohou být různé od atmosférických poruch po lidskou chybu. Z tohoto důvodu je nutno použít dostatečnou ochranu a signalizační zařízení, které nám pomáhají v případě poruchy lokalizovat místo poruchy a co nejrychleji tuto část odpojit.

2. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn

Elektrická vedení se řeší dvěma způsoby, a to buď jako venkovní nebo jako kabelová vedení. U obou druhů vedení je třeba nejprve navrhovat po elektrické stránce (provozní napětí, proudové zatížení, úbytky napětí, přenosové ztráty atp.) a následně po konstrukční a mechanické stránce. U kabelových vedení je mechanická a konstrukční stránka obecně jednodušší než u venkovních vedení, u venkovních vedení je třeba vzít v potaz atmosférické vlivy (vítr, námraza atp.) a jejich změnu podél trasy vedení. Při návrhu je tedy třeba najít optimální řešení jak z hlediska elektrického, tak i z hlediska mechanického [2].

2.1 Venkovních vedení

Venkovní vedení tvoří vodiče zavěšené nad terénem. Tyto vodiče jsou převážně holé a bezpečnost jejich použití je zajištěna především jejich pozicí vysoko nad terénem. Jejich pořizovací náklady jsou mnohem nižší, než u kabelových vedení což je také důvod, proč jsou používány [1].

2.1.1 Parametry venkovního vedení

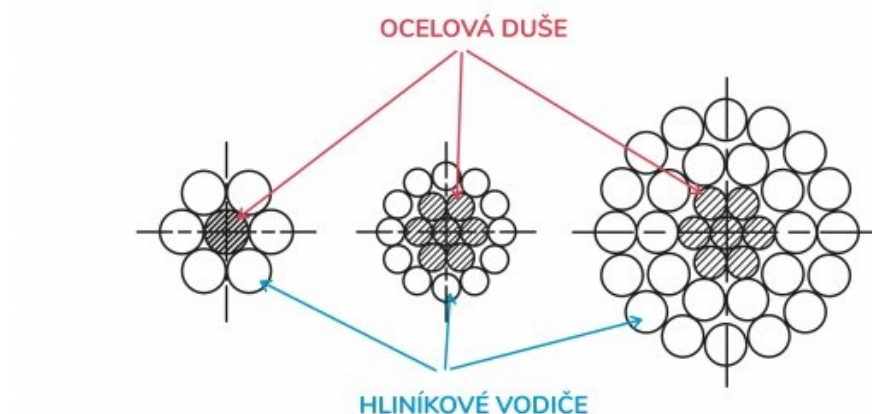
K volbě druhu a typu venkovního vedení využíváme následujících parametrů a vlastností:

- Nízké náklady (jak provozu, tak výroby)
- Nízký elektrický odpor
- Velká pevnost
- Dobrá odolnost vůči chemickým vlivům
- Nízká hmotnost z hlediska zatížení nosných částí
- Malý průřez z hlediska atmosférických jevů, avšak velký z hlediska rušení korunou

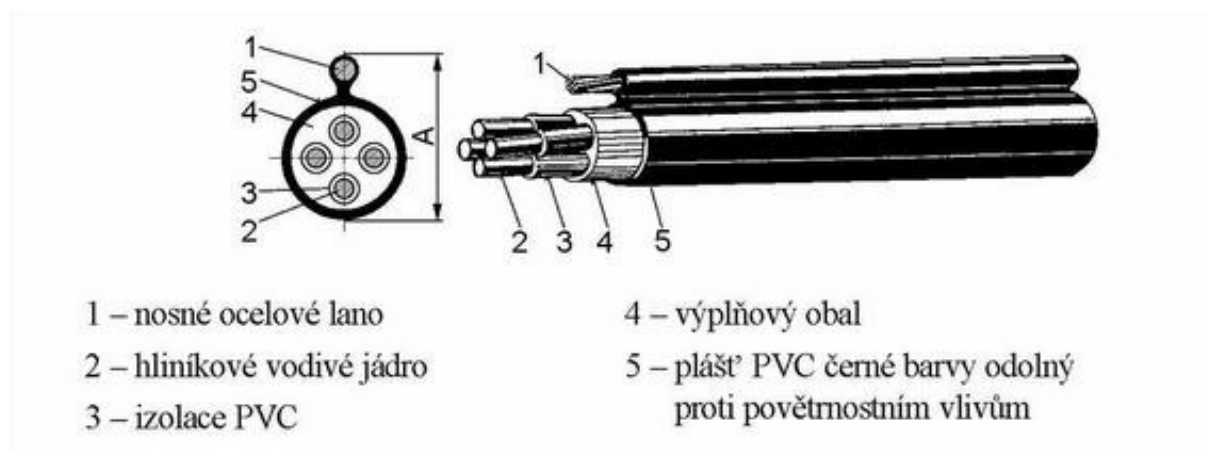
Vodiče venkovního vedení jsou používány lana, dráty a závěsné kabely. Nejpoužívanějšími materiály jsou měď a hliník, který se však doplňuje o železo z důvodu jeho jinak malé pevnosti (lana AlFe)

2.1.2 Konstrukčně můžeme vedení řešit různými metodami:

- a) Dráty-můžeme použít u vedení nn (do 1000 V)
- b) Prostá lana-lze využít pro silová vedení všech napětí. Výroba se provádí zkrucováním jednotlivých vrstev drátu a to tak, že se dráty každé vrstvy otáčejí na druhou stranu, čímž se zabraňuje rozmotávání. Proti drátu jsou lana těžší, mají větší elektrický odpor, menší pevnost, indukčnost a také menší modul pružnosti. Největší výhodou je lepší ohebnost, a bezpečnější provoz.
- c) Kombinovaná lana-jsou kombinovaná ze dvou materiálů. Jeden se vyznačuje velkou elektrickou pevností a tvoří nosnou část lana tzv. duši, kdy se nejčastěji používá ocel. Druhý má naopak velkou elektrickou vodivost a tvoří elektrovodnou část neboli plášť. Převážně se používají kombinace hliníku s ocelovou duší, AlFe, nebo slitiny hliníku s ocelovou duší.
- d) Závěsné kabely-používají se pro vedení nn, kde nahrazují přípojky. Konstrukčně je tvořen klasickým hliníkovým kabelem, ke kterému je ve společné izolaci připojeno nosné ocelové lano [1].



Obr. 1: Průřez kombinovaným lanem AlFe [8]



Obr. 2: Závěsný kabel [9]

2.1.3 Elektrické parametry venkovního vedení

Mezi základní parametry venkovního vedení se řadí rezistence, indukčnost (popř. indukční reaktance), konduktance a kapacita (popř. kapacitní susceptance). Tyto parametry se zpravidla uvádějí na jednotku délky.

Odpor R a indukční reaktance $X = \omega L$ vytvářejí podélnou impedanci $Z = R + j\omega L = R + jX$. Příčná admitance je tvořena konduktancí G a kapacitní susceptancí $B = \omega C$, $Y = G + j\omega C = G + jB$. Podélná impedance a příčná admitance jsou vyjádřeny na jednotku délky, jsou-li veličiny R , X , G a B vyjádřeny na jednotku délky [1].

2.1.3.1 Rezistance

Obeční vztah při ustáleném stejnosměrném proudu (používá se i při střídavých proudů):

$$R_{ss} = \rho_0 * \frac{l}{S} [\Omega \cdot m^{-1}] [1] \quad (1)$$

ρ_0 měrný odpor (materiálová jednotka obvykle udávána při 20 °C) [$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$]

l délka vodiče [m]

S průřez vodiče [mm^2]

Tento vztah je pro ideální podmínky v provozu musíme uvažovat i ostatní faktory:

- Materiál a jeho čistotu – vyjadřujeme měrným odporem udávaným předepsanou normou pro teplotu ϑ_0 .

Tab. 1: Rezistivita vodičů při 20 °C [1]

Materiál	Cu	Al, AlFe	Fe (přibližně)
ϑ_{20} [$\mu\Omega\cdot m$]	$17,8 \cdot 10^{-3}$	$28,7 \cdot 10^{-3}$	$200 \cdot 10^{-3}$

- b) Změna teploty vedení – se respektuje činitelem

$$k_{\vartheta} = 1 + \alpha * (\vartheta - \vartheta_0) + \beta * (\vartheta - \vartheta_0)^2 \quad [-] \quad [1] \quad (2)$$

α, β teplotní činitele odporu [K^{-1}], [K^{-2}]

ϑ uvažovaná teplota [$^{\circ}C$]

ϑ_0 původní teplota [$^{\circ}C$]

Člen $\beta * (\vartheta - \vartheta_0)^2$ zanedbáváme u vodičů Cu, Al a AlFe při oteplení do 100 °C, a u Fe vodičů do 50 °C.

Tab. 2: Teplotní činitele odporu [1]

Materiál	Cu	Al, AlFe	Fe(přibližně)
α [K^{-1}]	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
β [K^{-2}]	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$

- c) Povrchový jev (skinefekt) – jedná se o nerovnoměrné rozdělení střídavého proudu na průřezu vodičem, což vede ke zvětšení rezistence oproti stejnosměrnému proudu. Vyjadřujeme jej stanovením činitele zvětšení rezistence k_s . Pro vodič z jednoho materiálu při kruhovém průřezu lze stanovit výpočtem pomocí Besselových funkcí. Zavedeme-li

$$m = \frac{r}{2} * \sqrt{\frac{\mu * \omega}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\mu * f}{2R_{ss}}} \quad [-] \quad [1] \quad (3)$$

μ permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]

ω úhlová frekvence [s^{-1}]

ρ_0 rezistivita při teplotě ϑ_0 [$\Omega \cdot m$]

f frekvence [Hz]

r poloměr vodiče [m]

R_{ss} odpor při stejnosměrném proudu na jednotku délky [$\Omega \cdot m^{-1}$]

Lze u Al vodičů a Cu vodičů použít díky povrchovému jevu zjednodušené vztahy pro činitel zvětšení:

$$k_s = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} \quad \text{pro } m \leq 1,2 \quad [1] \quad (4)$$

$$k_s = 0,25 + 0,708m + 0,06625m^{-1} \quad \text{pro } m > 1,2 \quad [1] \quad (5)$$

Pro feromagnetické materiály pak platí:

$$k_s = 1 + 0,85m^2 - 0,3m^3 + 0,05m^4 \quad \text{pro } m \leq 2 \quad [1] \quad (6)$$

$$k_s = 1,4m \quad \text{pro } m > 2 \quad [1] \quad (7)$$

Lana AlFe mají zvláštní postavení, jelikož činitel k_s závisí na počtu vrstev, ze kterých je lano tvořeno. Při jedné vrstvě Al vodičů na Fe duši je činitel k_s značně velký a závisí na permeabilitě a velikosti proudu, je-li však použito více vrstev než jedna lze použít vztah pro dutá lana, jelikož ocelovou duší prochází pouhé 2 až 3 % celkového proudu. Platí:

$$k_s = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-12} * \left[\frac{(r_2 - r_1) * f}{r_2 * R_{ss}} \right]^2 \quad [-] \quad [1] \quad (8)$$

r_1 vnitřní poloměr Al vrstvy [m]

r_2 vnější poloměr Al vrstvy [m]

f frekvence [Hz]

R_{ss} odpor při stejnosměrném proudu na jednotku délky [$\Omega \cdot m^{-1}$]

Pokud však dojde k pokrytí dílčích vodičů vrstvou oxidu, bude hodnota činitele k_s menší, než kolik vychází z předchozích vztahů.

- d) Kroucení lan – způsobí proti plnému vodiči stejné osově délky zvětšení odporu. Označujeme jej činitelem k_s . Přítomnost oxidů a nečistot, vytvoří velký přechodový odpor mezi povrchy jednotlivých vodičů, což má za následek rozdělení proudu na jednotlivé vodiče lana, které mají

průměr d a prochází šroubovicí. Činitel rezistence zkroucením je dán poměrem délky závitů šroubovice k její výšce a_n , měřené v ose vodiče. Platí:

$$k_1 = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \cdot \pi^2}}{a_n} [-] [1] \quad (9)$$

a_n výška šroubovice [m]

D_n vnější průměr lana [m]

d průměr vodiče [m]

e) Průhyb – vyjadřujeme jej činitelem k_p .

$$k_p = \frac{l_h}{d} [-] [1] \quad (10)$$

l_h délka řetězovky $l_h = 2c * \sinh \frac{d}{2c}$ [m] [1]

d vzdálenost bodů zavěšení [m]

c parametr řetězovky [m]

Výslednou rezistanci lze na jednotku délky vypočítat ze vztahu:

$$R_1 = R_{ss} * k_\vartheta * k_s * k_1 * k_p [\Omega] [1] \quad (11)$$

Mnohdy se musí také počítat s odporem země, která se může použít jako vodič elektrické energie. Její činný odpor se spočítá ze vztahu:

$$R_z = \pi^2 * f * 10^{-4} [\Omega \cdot \text{km}^{-1}] [1] \quad (12)$$

2.1.3.2 Indukčnost

Průchodem proudu vodičem se indukuje elektromagnetické pole, jež působí jak na vodič samotný, tak na ostatní vodiče kolem něj. Z tohoto důvodu uvažujeme vlastní a vzájemnou indukčnost. Pro vlastní indukčnost můžeme odvodit následující vztah, jež udává velikost indukčnosti vztažené na jednotku délky:

$$L = 0,46 * \log \frac{2l}{a} - 0,15 [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (13)$$

l délka vodiče [m]

r poloměr vodiče [m]

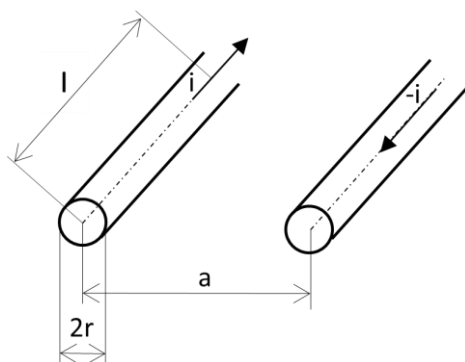
Pro vzájemnou indukčnost, též na jednotku délky, vyjádříme následující vztah:

$$M = 0,46 * \log \frac{2l}{a} - 0,2 [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (14)$$

a vzdálenost mezi vodiči [m]

• Dvouvodičové vedení

Proudová smyčka je tvořena dvěma rovnoběžnými vodiči, kterými protéká proud i stejné velikosti, avšak opačného směru. Vodiče jsou kruhového průřezu o poloměru r , jsou od sebe osově vzdálené o $a \gg r$ a mají konečnou délku smyčky $l \gg a$. [10]



Obr. 3: Dvouvodičové vedení [4]

Elektromotorickou sílu jednoho vodiče určíme ze vztahu:

$$e = -L \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt} = (-L + M) \cdot \frac{di}{dt} = -L_c \cdot \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad (15)$$

Z kterého plyne vzorec pro indukčnost vodiče:

$$L_c = L - M = \left(0,46 \cdot \log \frac{2l}{a} - 0,15\right) - \left(0,46 \cdot \log \frac{2l}{a} - 0,2\right), \quad (16)$$

$$L_c = 0,46 \cdot \log \frac{a}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (17)$$

a vzdálenost vodičů [m]

r poloměr vodičů [mm].

- Symetrické trojfázové vedení**

Uvažujeme, že máme tři vodiče stejných průřezů v trojúhelníkové formaci, jejichž součet proudů tekoucích vodiči je neustále roven nule. Vzájemné indukčnosti M mezi vodiči jsou stejné.

Pro elektromotorickou sílu lze vyjádřit vzorec:

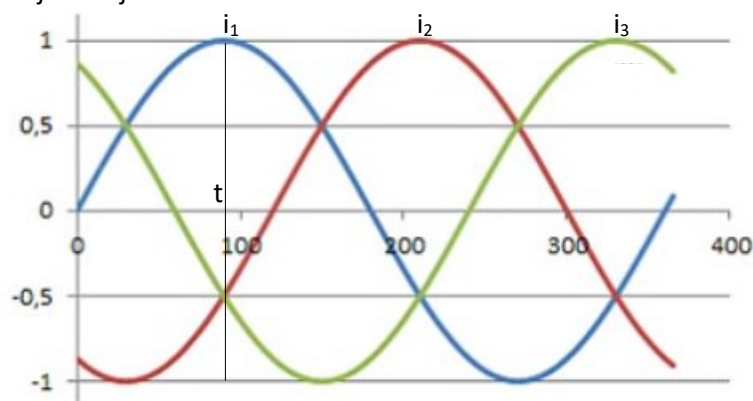
$$e = -L \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt} - M \cdot \frac{di_3}{dt} = -L \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_1}{dt} = -L_c \cdot \frac{di_1}{dt} \text{ [V]} \quad (18)$$

Celková indukčnost se pak vyjádří vzorcem:

$$L_c = 0,46 \cdot \log \frac{a}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (19)$$

- Nesymetrické trojfázové vedení**

Součet proudů tekoucích vodiči je roven nule tak jako u symetrického vedení, avšak díky nesymetrii. Nejsou stejné vzájemné indukčnosti mezi vodiči.



Obr. 4: Průběh třífázového proudu

Dále si musíme určit poměr proudů v časovém bodě t, kdy je proud i_1 maximální.

$$-i_1 = i_2 + i_3 \rightarrow i_2 = i_3 = -\frac{i_1}{2} \quad (20)$$

Elektromotorické napětí vyjádříme ze vzorce:

$$e = -L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} \cdot M_{12} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} \cdot M_{13} \frac{di_1}{dt} = -\left(L - \frac{1}{2} \cdot M_{12} - \frac{1}{2} \cdot M_{13}\right) \frac{di_1}{dt} = -L_{c1} \frac{di_1}{dt} \text{ [V]} \quad (21)$$

Indukčnost vodiče vyjádříme následovně:

$$L_{c1} = L - \frac{1}{2} * M_{12} - \frac{1}{2} * M_{13} = 0,46 * \log \frac{\sqrt{a_{12} * a_{13}}}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (22)$$

Obdobně vyjádříme i indukčnosti zbývajících vodičů:

$$L_{c2} = 0,46 * \log \frac{\sqrt{a_{12} * a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (23)$$

$$L_{c3} = 0,46 * \log \frac{\sqrt{a_{13} * a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (24)$$

Z předchozích vztahů určíme střední indukčnost vedení na kilometr:

$$L_{cstř} = \frac{1}{3} * (L_{c1} + L_{c2} + L_{c3}) = 0,46 * \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} * a_{13} * a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (25)$$

Případně:

$$L_{cstř} = 0,46 * \log \frac{a_s}{r} + 0,05 \text{ [mH.km}^{-1}] \quad (26)$$

r poloměr vodiče [m]

a_{xy} vzdálenost mezi vodiči [m]

a_s střední vzdálenost vodičů $a_s = \sqrt[3]{a_{12} * a_{13} * a_{23}}$ [m] (27)

2.1.3.3 Kapacita

Prochází-li vodičem proud vytváří se elektrické pole, jež působí jak na okolí vodiče, tak i na vodič samotný. Díky tomu vykazuje vedení i kapacitní složku. Pro výpočet kapacity vodiče vycházíme ze vztahu pro elektrický potenciál U :

$$U = \frac{Q}{2\pi * \epsilon} * \ln \frac{\rho_0}{\rho} \text{ [V]} \quad (28)$$

Q náboj vodiče [C.m⁻¹]

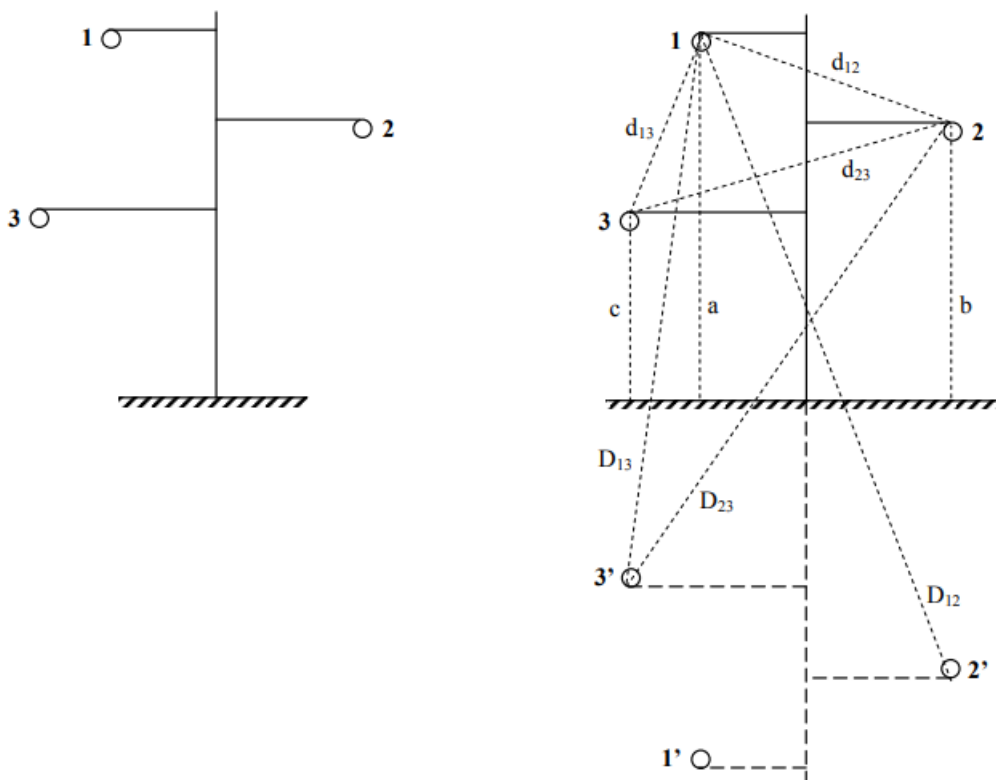
ρ vzdálenost od vodiče [m]

ρ_0 vzdálenost od vodiče, ve které se předpokládá nulový potenciál [m]

ϵ permitivita $\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r$ [F.m⁻¹] (29)

ϵ_0 permitivita vakua $\epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12}$ F.m⁻¹

ϵ poměrná permitivita vzduchu $\epsilon = 1$ F.m⁻¹



Obr. 5: Nesymetrické třífázové vedení bez uvažování země (vlevo) a s uvažováním země (vpravo) [6]

- **Třífázové vedení**

Uvažujeme nesymetrické vedení, jehož vodiče jsou od sebe ve vzdálenosti d_{xy} . Obdobně jako u určení indukčnosti počítáme v časovém bodě t , kdy je první fáze v maximu. Poté platí pro elektrické náboje vztah:

$$Q = Q_1 \rightarrow Q_2 = Q_3 = -\frac{Q}{2} \quad [6] \quad (30)$$

Pro elektrický potenciál vodiče poté určíme vztah:

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon} * \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} * \ln \frac{\rho_0}{d_{12}} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} * \ln \frac{\rho_0}{d_{13}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} * \ln \frac{\sqrt{d_{12} * d_{13}}}{r} \quad [V] \quad [6] \quad (31)$$

Pro kapacitu vodičů pak platí vztahy:

$$C_1 = \frac{1}{18 * \ln \frac{\sqrt{d_{12} * d_{13}}}{r}} \quad [\mu F.km^{-1}] \quad [6] \quad (32)$$

$$C_2 = \frac{1}{18 * \ln \frac{\sqrt{d_{12} * d_{23}}}{r}} \quad [\mu F.km^{-1}] \quad [6] \quad (33)$$

$$C_3 = \frac{1}{18 * \ln \frac{\sqrt{d_{13} * d_{23}}}{r}} \quad [\mu F.km^{-1}] \quad [6] \quad (34)$$

Z výše uvedených vzorců můžeme vyjádřit vztah pro střední kapacitu vedení:

$$C_{stř} = \frac{1}{3} * (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 * \ln \frac{\sqrt[3]{d_{12} * d_{13} * d_{23}}}{r}} = \frac{1}{18 * \ln \frac{d_s}{r}} \quad [\mu F.km^{-1}] \quad [6] \quad (35)$$

$$d_s \quad \text{střední vzdálenost vodičů } d_s = \sqrt[3]{d_{12} * d_{13} * d_{23}} \quad [m] \quad [6] \quad (36)$$

- **Třífázové vedení s uvažováním vlivu země**

V tomto případě je nutné navíc zadat vzdálenost vodičů od země (a, b, c), a jejich vzdálenosti od zrcadlových obrazů (D_{xy})

$$C_{stř} = \frac{1}{3} * (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 * \ln \frac{d_s * 2m}{r * D_s}} = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s * 2m}{r * D_s}} [\mu F.km^{-1}] \quad [6] \quad (37)$$

$$D_s \quad \text{střední vzdálenost zrcadlových obrazů } D_s = \sqrt[3]{D_{12} * D_{13} * D_{23}} \quad [m] \quad [6] \quad (38)$$

$$m \quad \text{střední vzdálenost vodičů od země } m = \sqrt[3]{a * b * c} \quad [m] \quad [6] \quad (39)$$

2.2 Kabelové vedení

2.2.1 Elektrické parametry kabelového vedení:

2.2.1.1 Podélná impedance kabelového vedení

Podélná impedance je stejně jako u venkovního vedení tvořena rezistancí R a indukční reaktancí $X = \omega L$. Rezistance se určuje stejně jako u venkovního vedení, jen místo průhybu se uvažuje její navýšení, a to z důvodu možné přítomnosti kovového pláště a kovového pancíře, což se projevuje vířivými proudy, hysterezí a vlivu blízkosti. Tyto vlivy se matematicky dají jen těžko vyjádřit, a proto se označují jednotně jako přídatná rezistance ΔR . Rezistance se poté vyjádří vztahem:

$$R = R_{\sim} + \Delta R \quad [\Omega] \quad [1] \quad (40)$$

R_{\sim} rezistance za střídavého proudu bez uvažování vlivů

Přídatná rezistance svou velikostí závisí na průřezu, kdy při zvětšení průřezu se zvětší, dále závisí na typu a jmenovitém napětí použitého kabelu. Výslednou rezistanci můžeme tedy určit vztahem:

$$R = k_{\theta} * k_s * k_1 * R_{ss01} + \Delta R \quad [\Omega] \quad [1] \quad (41)$$

k_{θ} , k_s , k_1 činitelé ze vztahu (11)

Pro výpočet induktivní reaktance se využijí vzorce stejné jako u venkovního vedení, kdy budou vypočítané hodnoty méně přesné, avšak pro provozní užití plně použitelné.

2.2.1.2 Příčná admitance kabelového vedení

Příčná admitance je tvořena konduktancí G a kapacitní susceptancí $B = \omega C$. Díky různorodosti konstrukčního uspořádání a použitelnosti různých materiálů pro izolaci jsou výsledné hodnoty značně rozdílné v jednotlivých případech.

2.2.1.3 Kapacita kabelového vedení

Uvažujeme dvě skupiny kabelů:

- (1) Jednožilové nebo více žilové s vlastním kovovým obalem na každé žíle,
- (2) Vícežilové se společným kovovým pláštěm pro všechny žíly.

Kabely typu (1) se rozdělují na jednožilové, trojplášťové s olověným pláštěm na každé žíle a stíněné s kovovou fólií, případně pokovovaným papírem na každé žíle. Elektrické pole těchto kabelů je radiální, a kabely samotné mají pouze jednu kapacitu danou kapacitou vodiče proti plášti. Kapacita těchto kabelů se vypočte stejně jako u sousých válců:

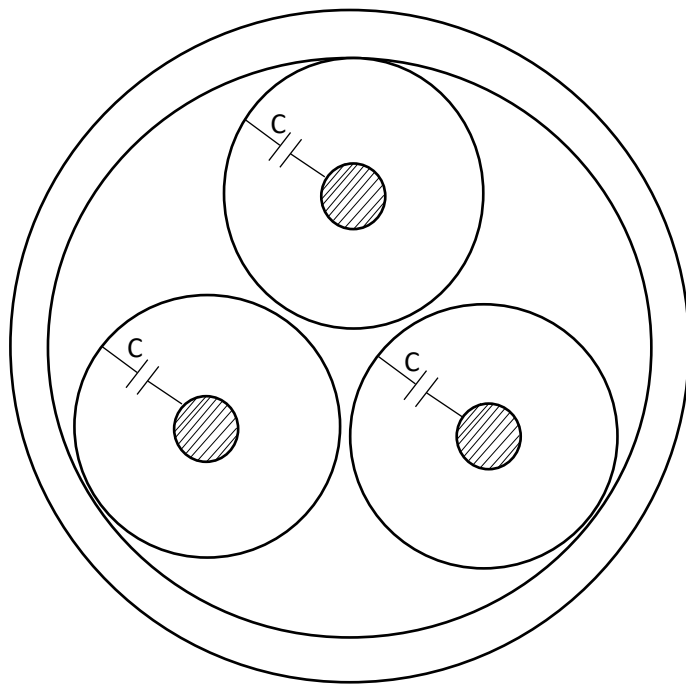
$$C = \frac{0,0242 * \epsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} [\mu F.km^{-1}] \quad [1] \quad (42)$$

ϵ_r poměrná permitivita mezi vodičem a kovovým obalem [-]

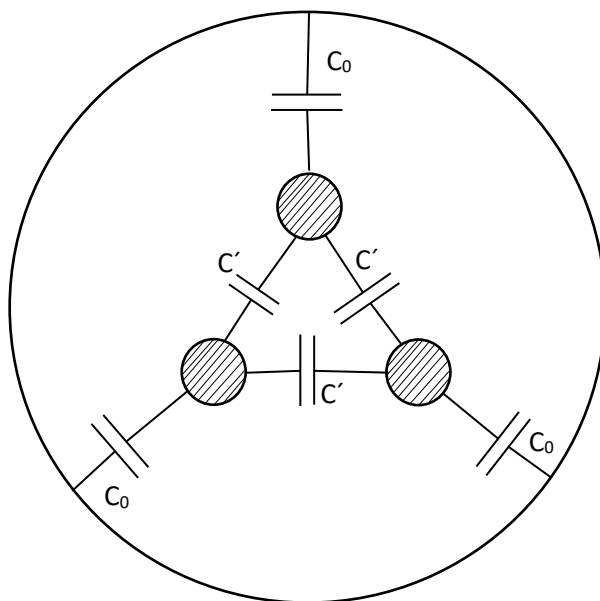
R_1 poloměr vodiče [cm]

R_2 vnitřní poloměr kovové obálky [cm]

Kabely typu (2) mají pouze společný kovový plášť pro všechny žíly. Kapacita kabelů tohoto typu je ovlivněna nejen kapacitou vodiče vůči plášti C_0 , nýbrž i kapacitou vzájemnou C' . Tyto kapacity jsou pro všechny žíly stejné, a to bez ohledu na geometrickou souměrnost vedení.



Obr. 6: Kapacity stíněných a trojplášťových kabelů [1]



Obr. 7: Kapacity kabelů se společným pláštěm [1]

Výpočty pro určení kapacity kabelů jsou často dosti složité, z tohoto důvodu se používají hodnoty kapacity zadané výrobcem, pokud výrobce hodnotu neudává jen nutno kapacitu určit měřením. Pro výpočet z naměřených hodnot budeme potřebovat napájecí proud I_{NAB} , což je proud tekoucí do kabelu za stavu naprázdno, poté je výsledná kapacita na jednotku délky je dána vztahem:

$$C = \frac{I_{NAB}}{2\pi * f * l * U_f * 10^{-6}} [\mu F.km^{-1}] \quad (43)$$

I_{NAB}	nabíjecí proud [A]
f	frekvence [Hz]
l	délka vedení [km]
U_f	fázové napětí vedení [V]

3. Teoretický rozbor vzniku jednopólových poruch

V elektrizačních soustavách vznikají přechodné děje vždy při přechodu ES z jednoho ustáleného stavu do druhého ustáleného stavu. Tento přechod může zavinit mnoho příčin:

- Změna zátěže ES
- Porucha zařízení, tj. vypadnutí alternátoru ze synchronismu, zkratů apod.
- Přírodní vlivy, např.: atmosférické jevy
- Lidský zásah, např.: zničení izolace při instalaci

3.1 Zkrat

Zkrat se na ES objeví v důsledku porušení izolací a následného spojení dvou či více fází, případně spojení fází se zemí.

Následky zkratu:

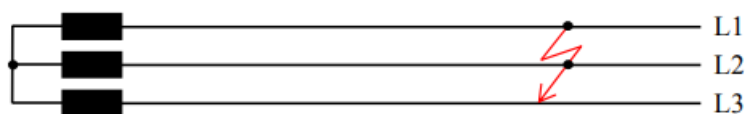
- Výpadek stroje ze synchronismu
- Tepelné účinky
- Mechanické síly vznikající mezi vodiči
- Snížení hladiny napětí mimo místo zkratu

3.1.1 Rozdělení zkratů

Základní dělení zkratů je na souměrný a nesouměrný, které se dělí následovně:

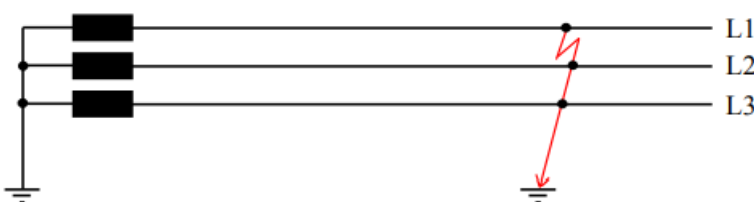
3.1.1.1 Souměrný zkrat

- Trojfázový zkrat-tento typ zkratu se nejčastěji vyskytuje u kabelového vedení a jedná se o spojení všech tří fází.



Obr. 8: Trojfázový zkrat [7]

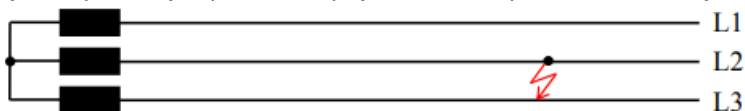
- Trojfázový zemní zkrat-je způsoben spojením všech fází se zemí.



Obr. 9: Trojfázový zemní zkrat [7]

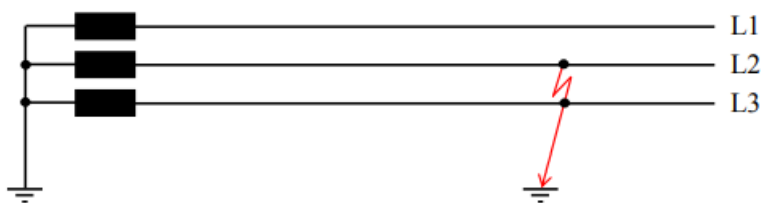
3.1.1.2 Nesouměrný zkrat

- Dvojfázový zkrat-je způsoben spojením libovolných dvou fází na jednom místě.



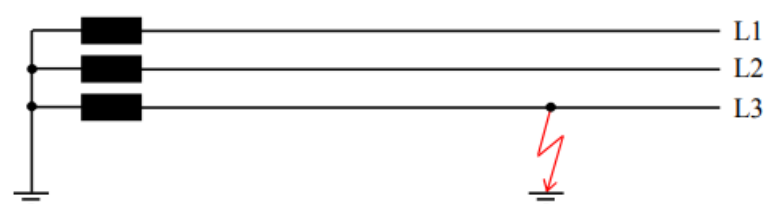
Obr. 10: Dvojfázový zkrat [7]

- Dvofázový zemní zkrat-je způsoben spojením libovolných dvou fází se zemí v jednom místě.



Obr. 11: Dvofázový zemní zkrat [7]

- Jednofázový zkrat-spojení libovolné fáze se zemí.



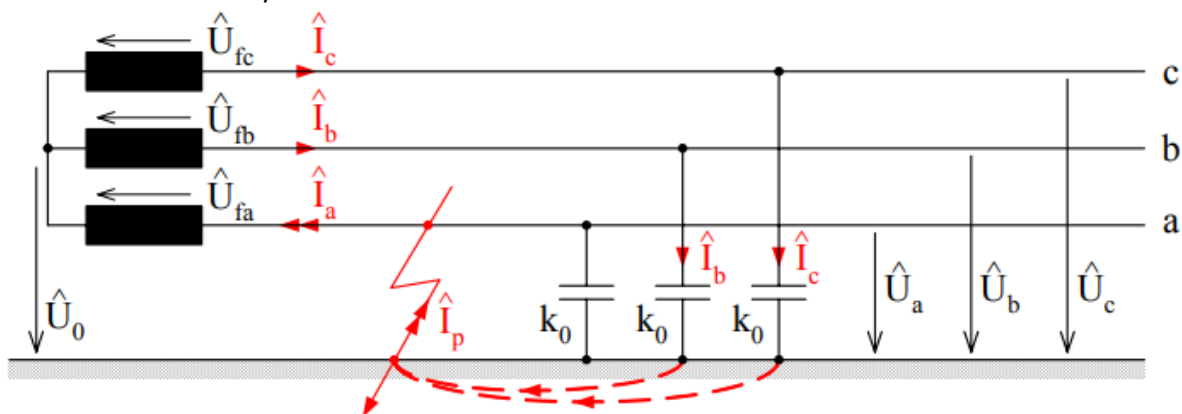
Obr. 12: Jednofázový zkrat [7]

3.2 Zemní spojení

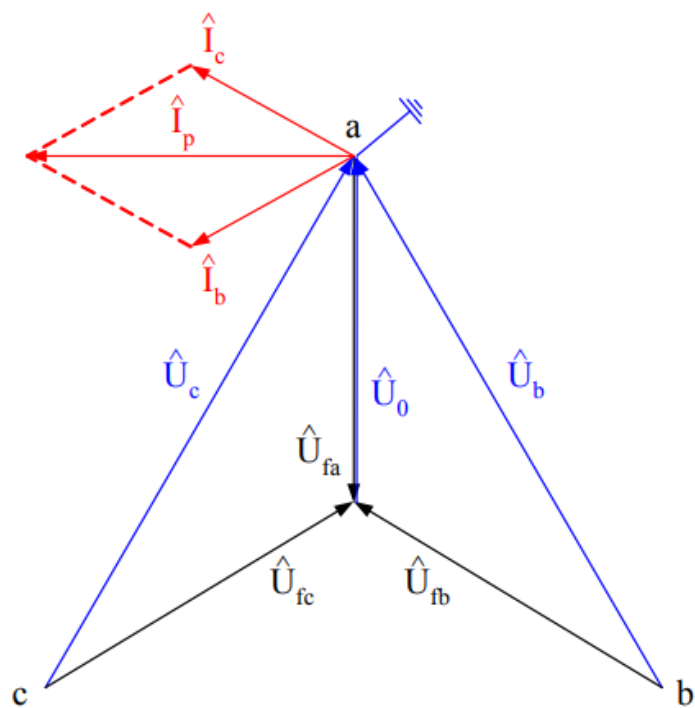
Jedná se o galvanické spojení fáze se zemí, a to v sítích s izolovaným uzlem, s nepřímo uzemněným uzlem (uzemnění přes odpor), nebo s kompenzovaným uzlem (uzemnění přes tlumivku).

Následky vzniku zemního spojení:

- Pokud dochází k přerušovanému zemnímu spojení díky zhasínání oblouku v nule a následnému zapálení hrozí vznik přepětí
- Možný vznik zkratu



Obr. 13: Zemní spojení v síti s izolovaným uzlem [6]



Obr. 14: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení [6]

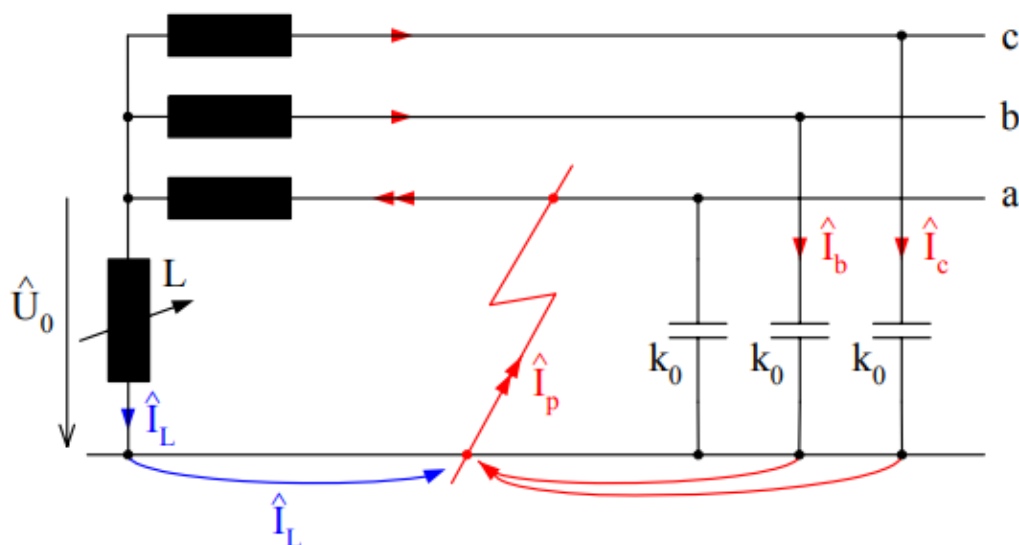
\bar{U}_0	napětí na tlumivce
$\bar{U}_{fa}, \bar{U}_{fb}, \bar{U}_{fc}$	fázová napětí
\bar{U}_b, \bar{U}_c	napětí jednotlivých fází vůči zemi
\bar{I}_p	poruchový proud
\bar{I}_b, \bar{I}_c	proudy fází B a C

4 Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů

Kompenzace zemních kapacitních proudů se může kompenzovat od 5 A kdy, jestli jsou kapacitní proudy větší než 10 A je jejich kompenzace již nutná. Nejrozšířenějším způsobem kompenzace zemních kapacitních proudů je pomocí zhášecí tlumivky, jež se instaluje v rozvodnách na uzel napájecího transformátoru, případně na uměle vytvořenou nulu použitím zhášecího transformátoru. Další možností kompenzace kapacitních proudů je přes odporník.

4.1 Kompenzace sítě uzemněné přes zhášecí tlumivku

Při správném nastavení zhášecí tlumivky dochází ke kompenzaci kapacitních proudů na 3 %-10 % činného charakteru z celkových kapacitních proudů.



Obr. 15: Znázornění vlivu tlumivky [6]

Pokud dojde k ideálnímu zemnímu spojení je napětí uzlu $\bar{U}_0 = -\bar{U}_f$ a proud procházející tlumivkou bude zpožděn o $\pi/2$ za napětím \bar{U}_0 :

$$\bar{I}_L = -j * \frac{\bar{U}_0}{\omega * L} \text{ [A] [6]} \quad (44)$$

L předem nastavená indukčnost tlumivky [H]

Při plné kompenzaci platí vztah:

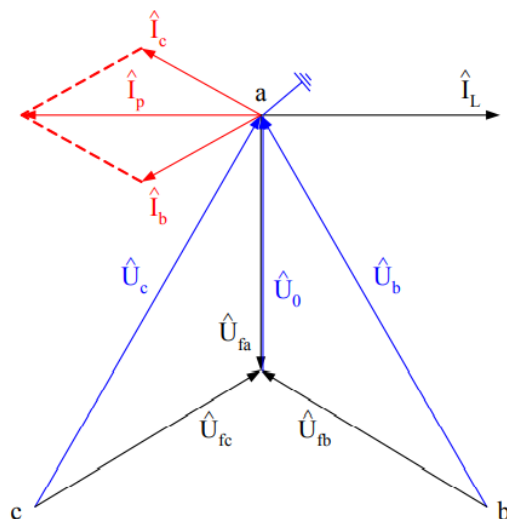
$$\bar{I}_L = -\bar{I}_p \text{ [6]} \quad (45)$$

Při následném použití rovnice:

$$-j \frac{\bar{U}_0}{\omega * L} = -3 * j\omega * k_0 * \bar{U}_0 \text{ [6]} \quad (46)$$

dostaneme vztah pro indukčnost ideální zhášecí cívky:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 * C} \text{ [H] [6]} \quad (47)$$

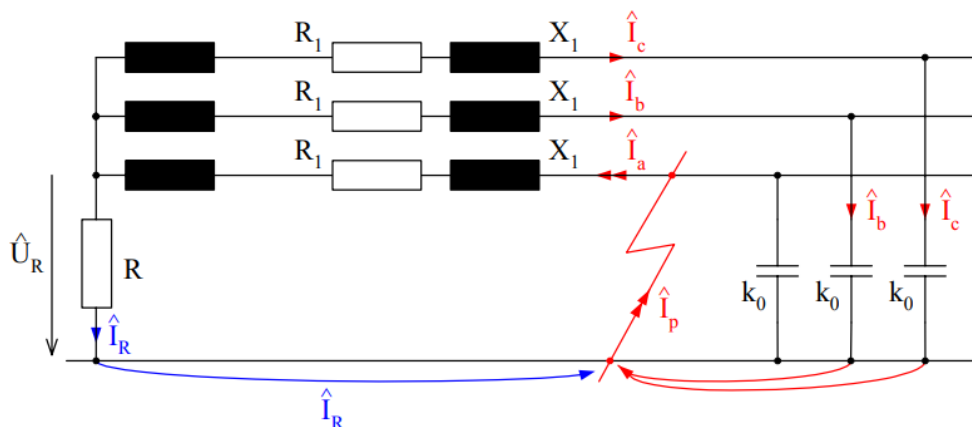


Obr. 16: Fázorový diagram kompenzace zemního proudu tlumivkou [6]

\bar{U}_0	napětí na tlumivce
$\bar{U}_{fa}, \bar{U}_{fb}, \bar{U}_{fc}$	fázová napětí
\bar{U}_b, \bar{U}_c	napětí fází vůči zemi
\bar{I}_L	kompenzační proud protékající cívkou tlumivky
\bar{I}_p	poruchový proud
\bar{I}_b, \bar{I}_c	proud protékající fázemi B a C

4.2 Kompenzace sítě uzemněné přes rezistor

Složitost naladění zhášecí tlumivky v kapacitně souměrných sítích vede spolu s jinými ekonomickými a technickými problémy k užívání odporově uzemněných sítí. Tento způsob uzemnění se používá především u kabelových sítí, kde je většina poruch trvalého charakteru, tudíž zmenšení poruchového proudu nemůže dojít k samozhášení poruch jako při obloukových poruchách u venkovního vedení. Přepětí při vzniku zemního spojení není tlumivkou omezováno. Při zemním spojení dochází k namáhání izolací zdravých fází zvýšeným napětím a přináší riziko vícenásobných poruch.



Obr. 17: Vliv činného odporu v uzlu trojfázové sítě [6]

Při jednofázovém zkratu protéká místem poruchy součet proudů činným odporem a kapacitního proudu celé sítě. Omezení zkratového proudu se provádí volbou vhodné velikosti odporu R v uzlu.

K tlumení přepětí dochází za splnění podmínky, že velikost proud uzlovým odporem I_R je větší, než je velikost kapacitního proudu sítě I_{kap} :

$$I_R > I_{kap} \quad [6] \quad (48)$$

$$\frac{U_f}{R} > 3\omega * U_f * C \quad [6] \quad (49)$$

Po úpravě vzorce dostaneme vztah pro odpor uzlového rezistoru:

$$R < \frac{1}{3\omega * C} \quad [\Omega] \quad [6] \quad (50)$$

Výsledný proud zemní poruchy je následně dán vektorovým součtem proudu uzlového rezistoru a kapacitního proudu sítě:

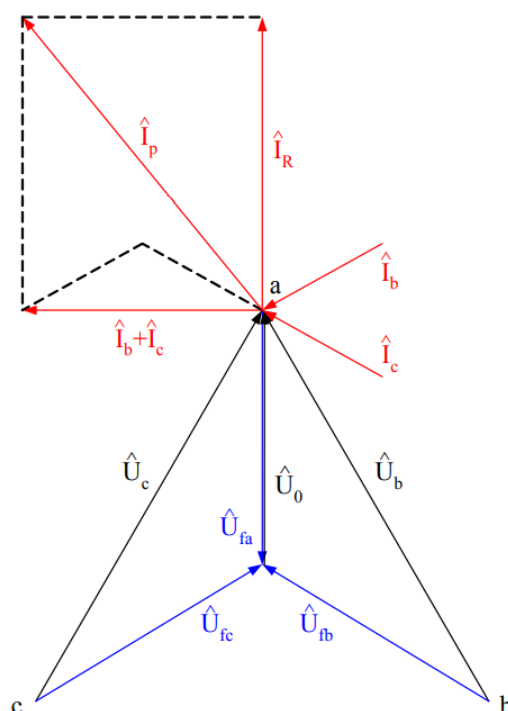
$$\bar{I}_p = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega * C\right) * U_f = \bar{I}_R + \bar{I}_{kap} \quad [A] \quad (51)$$

C kapacita soustavy [F]

R rezistance uzlového odporu [Ω]

U_f napětí fáze [V]

ω úhlová frekvence [rad.s^{-1}]



Obr. 18: Fázorový diagram kompenzace zemního proudu odporem [6]

5 Možnost lokalizace místa zemního spojení

Metody používané pro lokalizaci místa zemního spojení lze rozdělit do dvou základních skupin, a to na metody aktivní a pasivní.

Aktivní metody – pro lokalizaci zemního spojení jsou využívány pomocné signály o specifické frekvenci, který je připojen do soustavy v případě poruchy a jeho stopováním se zjišťuje poloha zemního spojení. Tyto metody jsou však technicky náročné, a proto se převážně nepoužívají.

Pasivní metody – k lokalizaci využívají monitorování napěťových a proudových poměrů bez nutnosti využití přídavného signálu. Tyto metody se dále dělí na dynamické využívající signál během přechodného děje a statické vyhodnocující ustálený signál po odeznění přechodného děje.

5.1 Statické metody

Statické metody využívají pro lokalizaci údaje dostupné po odeznění děje, někdy se však využívají i data pořízená před vznikem poruchy, a to za účelem zvýšení selektivity.

5.1.1 Metody využívané pro izolované distribuční soustavy

a) Porovnávání amplitudy netočivé složky proudu

Amplitudy netočivých složek proudů jednotlivých vývodů se začnou porovnávat, je-li překročena nastavená hodnota netočivého napětí. Postižené vedení poté poznáme, jelikož se na něm objeví maximální amplituda. Tato metoda má velkou nevýhodu ve své citlivosti a nutnosti velice přesného měření netočivé složky proudu. Tyto nevýhody se projeví zejména když je kapacita postiženého vývodu blízká celkové kapacitě soustavy nebo při vysoko-impedančních zemních spojeních.

b) Porovnání fáze netočivé složky vedení

Fáze netočivé složky proudu je u postiženého vývodu opačná proti nepostiženým vývodům. Citlivost metody je v případě krátkých vedení nízká, což má za následek špatnou lokalizaci. Vyhodnocení je dále komplikováno proudovou nesymetrií či vysoko-impedančním zemním spojením.

Pro zvýšení přesnosti se používá kombinace obou metod. Nejdříve se vyberou vývody s nejvyšší amplitudou netočivé složky proudu, poté se u nich provede porovnání fáze netočivé složky proudu. Vývod s opačnou fází je označen za postižený. Mají-li vývody stejnou fázi nastala chyba v rozvodně. K chybnému označení postiženého vývodu může dojít u vysoko-impedančního zemního spojení, v přítomnosti vedení krátkých délek.

c) Určení toku netočivé složky jalového výkonu

V případě výskytu zemního spojení dojde k zpoždění netočivé složky proudu za napětím o 90° , přičemž u nepostiženého vývodu proud předbíhá napětí o 90° . touto metodou se vyhodnocuje znaménko toku jalového výkonu. Je-li tok kladný je vývod označen za nepostižený, je-li tok záporný označí se vývod naopak za postižený. Tato metoda neřeší problém s lokací poruch s malým netočivým proudem, ovšem jeho výhodou je, že není nutno porovnávat výkon s ostatními vývody.

d) Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu

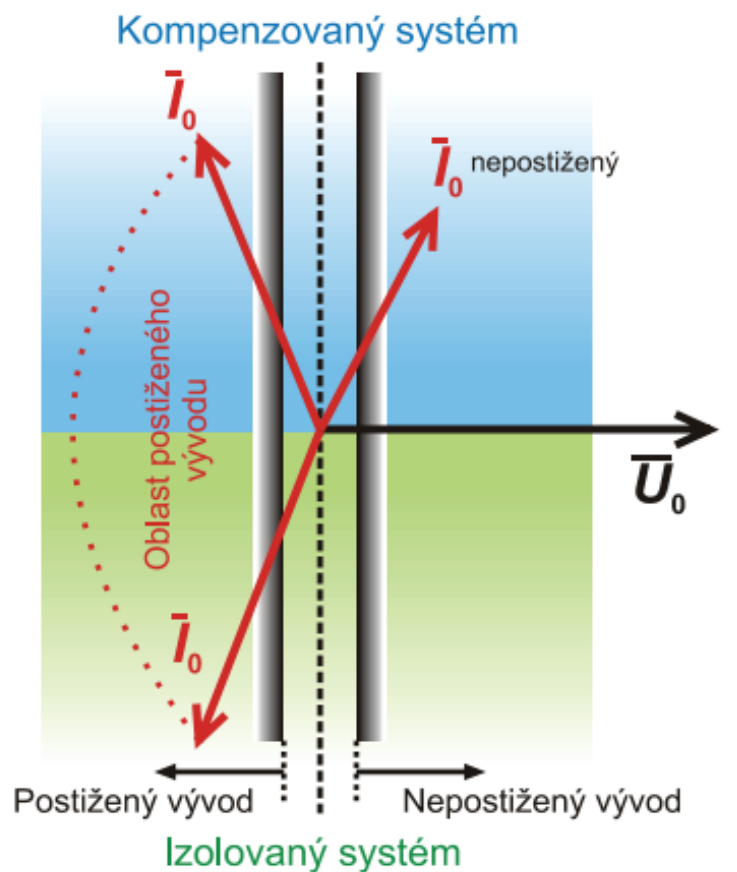
Touto metodou se vyhodnocuje změna netočivé složky proudu spolu s fázovým posuvem netočivé složky napětí, jejichž referenční hodnoty se získávají v bezporuchovém stavu. Ten vývod jehož změna jalové složky netočivého proudu byla největší je označen za postižený. Tímto postupem je omezen vliv nesymetrie na selektivitu metody

Všechny čtyři výše uvedené metody mají společnou nevýhodu, a to jejich nepoužitelnost v kompenzovaných soustavách. [3]

5.1.2 Metody vhodné pro kompenzované distribuční soustavy

a) Metody detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)

Z důvodu nerealizovatelnosti dokonalého vykompenzování poruchového proudu, lze pro lokalizaci použít právě tohoto reziduálního proudu. Činná složka netočivého proudu případně činný výkon netočivé složky poškozeného vývodu je vyšší a má opačný směr proti nepoškozeným vývodům. Této skutečnosti využívá právě Wattmetrická metoda. Zásadní vliv na správnou funkci metody mají vhodně navržené měřicí transformátory a velikost činné složky netočivého proudu. Právě rozdílné chyby fáze a úhlu použitých PTP vzhledem k nízké úrovni reziduálního proudu (3 % - 10 % kapacitního proudu sítě) mohou zapříčinit neselektivní působení metody. Pro zvýšení úrovně činné složky netočivého proudu, a tedy pro zvýšení citlivosti zemních ochran se nejen v České republice využívá krátkodobého připnutí pomocného odporníku. Příklad charakteristiky detekující činnou složku netočivého proudu je zobrazen na Obr. 19. Jelikož se distribuční soustava běžně nemusí provozovat zcela vykompenzovaná, ale může být mírně rozladěná, má netočivá složka proudu fázový posun dle charakteru provozu systému, jak je naznačeno na tomto obrázku.



Obr. 19: Příklad Charakteristiky Wattmetrického článku [3]

b) Admitanční metoda netočivé složky

Tato metoda je založena na nepřetržitém pozorování netočivé složky proudu \bar{I}_0 a napětí \bar{U}_0 , kde se při překročení přednastavené hodnoty netočivé složky napětí provede výpočet admitance pomocí vzorce:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} [\text{S}] \quad [3] \quad (52)$$

Aby se omezilo selhání metody vlivem nesymetrie systému, používá se častěji pro vyhodnocení admitance přírůstkové metody. Admitanci v tomto případě vyhodnocujeme z poměru přírůstku netočivého proudu a napětí mezi stavem před poruchou (prefault) a při poruše (fault) dle vztahu:

$$\bar{Y}_0 = \frac{(\bar{I}_{0_fault} - \bar{I}_{0_prefault})}{-(\bar{U}_{0_fault} - \bar{U}_{0_prefault})} = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0} [S] \quad [3] \quad (53)$$

V případě nepostiženého vývodu je výsledná admitance rovna celkové admitanci chráněného vývodu \bar{Y}_{yyv} a má v daném případě opačné znaménko:

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{yyv} = -(G_{yyv} + jB_{yyv}) [S] \quad [3] \quad (54)$$

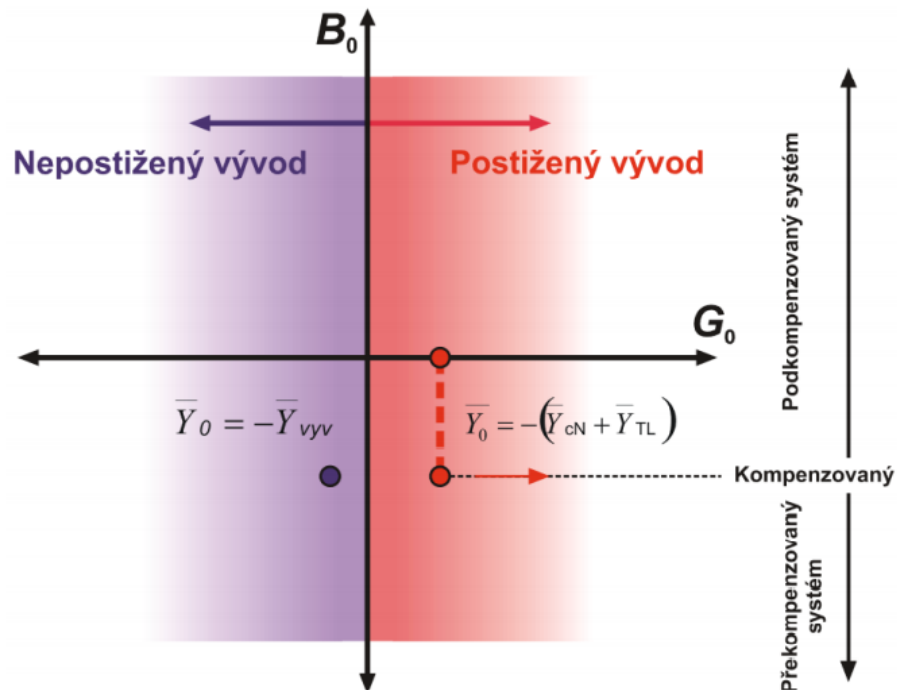
V praxi díky malého rozdílu složek \bar{I}_0 a \bar{U}_0 , a tedy nepřesnosti při výpočtu výsledné admitance však může mít i vypočtená konduktance G_{yyv} i kladné znaménko. Podobně i vypočtená susceptance B_{yyv} může dosahovat kladné hodnoty, a to vlivem chyby při měření nebo v případě decentrální kompenzace či při provozu systému v podkompenzovaném stavu. Výslednou admitanci pak určíme vztahem:

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL}) [S] \quad [3] \quad (55)$$

\bar{Y}_{cN} admitance všech nepostižených vývodů [S]

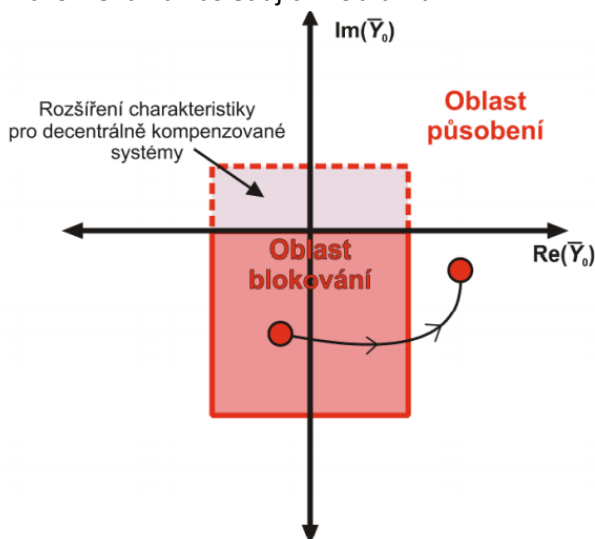
\bar{Y}_{TL} admitance zhášecí tlumivky [S]

Výsledná netočivá konduktance vycházející z minulého vzorce má v praktických případech kladné znaménko, kdežto znaménko susceptance je v tomto případě závislé na stupni kompenzace soustavy. Způsob funkce této admitanční metody je nastíněn na následujícím obrázku.



Obr. 20: Způsob funkce admitanční metody [3]

Zařízení, jež využívají Admitanční metody používají obdobné pracovní charakteristiky jako distanční ochrany s tím rozdílem, že pokud je vypočtená admitance uvnitř Admitanční charakteristiky, jedná se o nepostižený vývod (nepostižený úsek) a pokud je blokován, pokud se admitance dostane mimo pracovní charakteristiku (dojde k překročení hranice) dojde k popudu a vývod je označen jako postižený. Tato funkce je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr. 21: Příklad pracovní charakteristiky admitanční metody [3]

c) Konduktanční metoda

Tato metoda vychází z obdobného principu jako Admitanční metoda, zde je však rozdíl v tom, že se vyhodnocuje pouze konduktance vypočtená z netočivé složky napětí a proudu.

Pro poruchový vývod platí vztah:

$$G_0 = R_e * \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \text{ [S]} \quad [3] \quad (56)$$

Pro neporuchový vývod platí vztah:

$$G_0 = R_e \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = (G_{vyv}) \text{ [S]} \quad [3] \quad (57)$$

G_{cN} konduktance nepoškozených vývodů [S]

G_{TL} konduktance zhášecí tlumivky [S]

G_{vyv} konduktance chráněné linky [S]

d) Metoda vyšších harmonických

Cílem zhášecí tlumivky je kompenzace základní harmonické poruchového proudu, avšak díky přítomnosti nelineárních spotřebičů obsahuje kapacitní proud i násobky základní harmonické a to především 3., 5. a 7. řádu, jež nejsou kompenzovány. Metoda využívá právě těchto násobků a vyhodnocuje signály dané jejich sumací pro vyšší citlivost. Postiženým vývodem je ten, jež má nejvyšší úroveň tohoto signálu. Přesnost této metody vychází z předností měření a frekvenční analýzy.

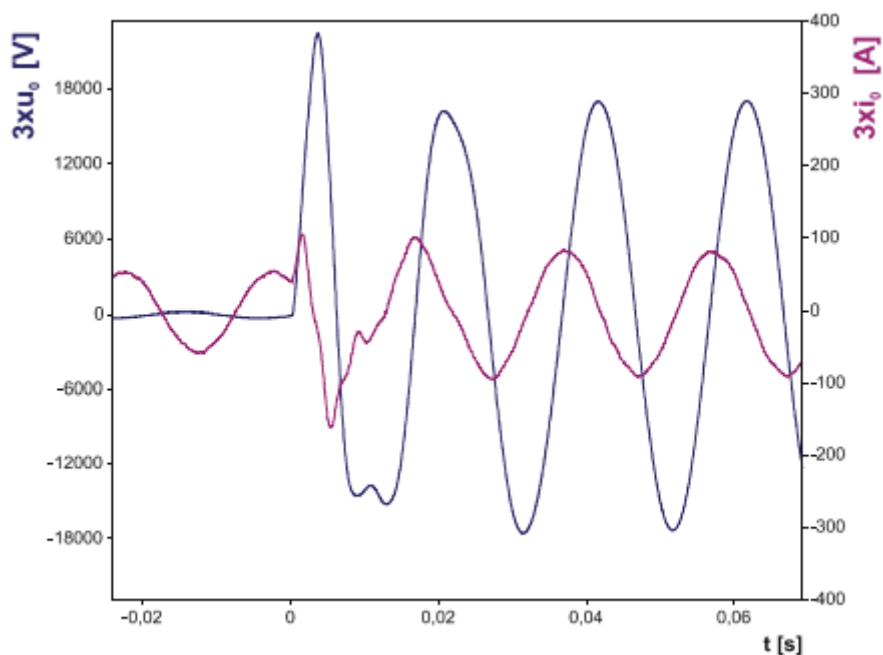
5.2 Dynamické metody

Tyto metody používají pro lokalizaci a vyhodnocení směru poruchy jev vzniklý při zemním spojení zvaný transientní. Při použití těchto metod je sice větší citlivost proti statickým metodám nicméně zásadní nevýhodou je převážně jeden pokus pro správnou lokalizaci poruchy.

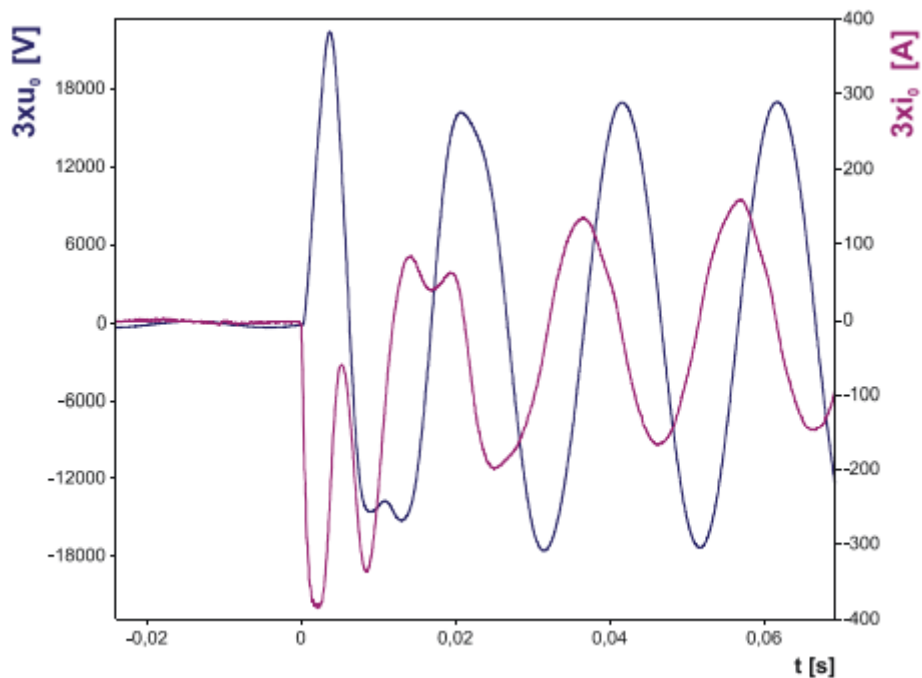
a) Metoda první půl-periody

Zemní spojení má za následek krátký přechodný děj trvající několik desítek milisekund. Při tomto ději dojde k vybití kapacity postižené fáze do fází nepostižených v soustavě. V důsledku tohoto jevu dojde ke vzniku vybíjecích proudů. Metoda porovnává průběhy netočivých složek hned po vzniku poruchy. Pokud jsou během první půl-periody napětí a proud ve fázi, tak jak je vyobrazeno na obr.22

je tento vývod označen za nepostižený. Jako postižený vývod se označí ten, jehož netočivé složky napětí a proudu jsou v protifázi dle obr.23. Výhoda této metody je využití při kompenzovaných špatně uzemněných sítích, naopak velkou nevýhodou je poměrně krátký čas pro vyhodnocení, či nemožnost lokalizace vysokoimpedančních poruch, jež potlačují transientní jev.



Obr. 22: Osciloskopický průběh netočivých složek napětí a proudu nepoškozeného vývodu [3]



Obr. 23: Osciloskopický průběh netočivých složek napětí a proudu poškozeného vývodu [3]

b) Metoda qu-diagramu

Metoda vyhodnocuje grafickou závislost netočivých složek proudu (představující náboj q_0) na napětí. Proces vybíjení nepostiženého vývodu lze popsat pomocí rovnic:

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} + \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau \text{ [V] [3]} \quad (58)$$

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \text{ [V] [3]} \quad (59)$$

T_0 čas vzniku zemního spojení [s]

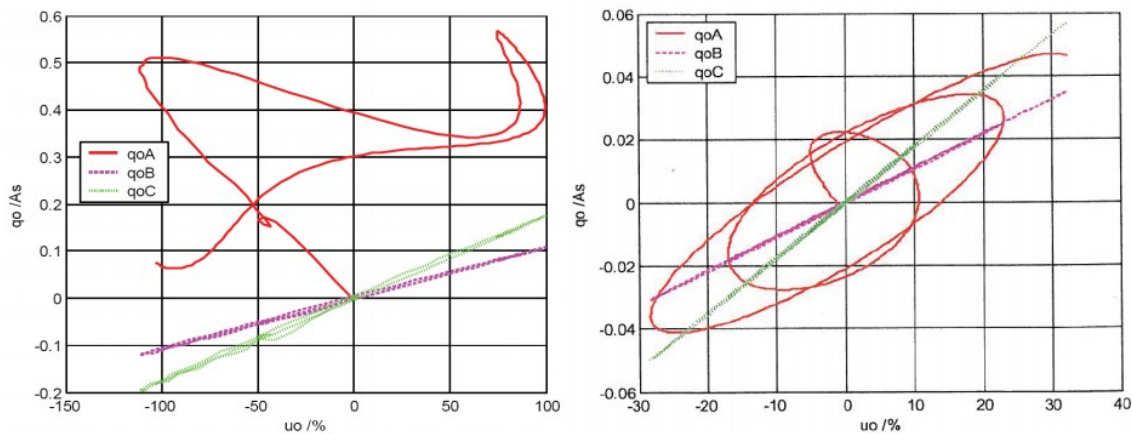
C_{eq} ekvivalentní kapacita mezi vodičem a zemí všech nepostižených vodičů v síti [F]

I_0 okamžitá složka netočivého proudu v monitorovaném obvodu [A]

Předpokládá-li se, v momentě vzniku zemního spojení okamžitá hodnota netočivé složky napětí nulová, poté je při nepoškozeném vedení závislost netočivé složky napětí na netočivé složce náboje lineární dle vztahu:

$$u_0(t) = \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \text{ [V] [3]} \quad (60)$$

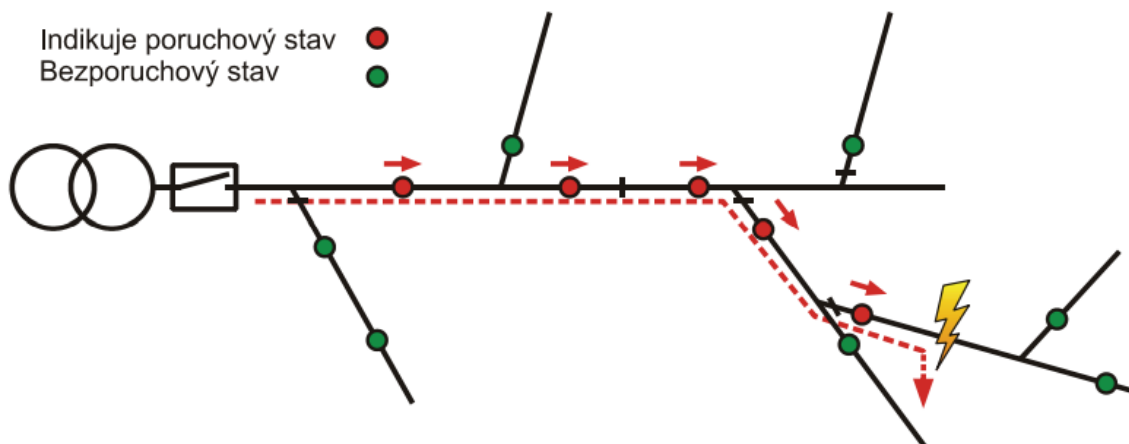
Výsledkem qu-diagramu uvedené rovnice bude přímka pouze u nepostiženého vývodu, jelikož je vlivem zhášecí tlumivky závislost u postiženého vývodu nelineární.



Obr. 24: Příklad qu-diagramu tří vývodů v případě nízkoodporové poruchy na vývodu qoA (qoB a qoC nepostižené) [3]

5.3 Lokalizace poruchy v sítích uzemněných přes odporník

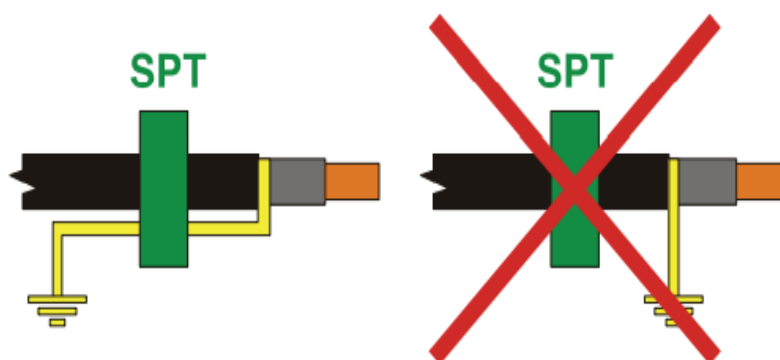
V případě kabelových sítí používáme pro detekci poruchy ty indikátory, které dokáží indikovat průchod zkratového proudu fázovým vodičem v soustavách vn. Jedná se o třífázový měřicí přístroj nezávisle vyhodnocující velikost proudu v jednotlivých fázích. K indikaci poruchového stavu dojde při překročení nastavené monitorovací hodnoty proudu a času zpoždění. Místo poruchy se dohledává postupnou kontrolou jednotlivých IZP na vedení, kdy místo poruchy je mezi posledním indikátorem indikujícím zkratový proud a prvním, který je v klidovém stavu tak jak je naznačeno na obrázku.



Obr. 25: Lokalizace místa poruchy za použití indikátorů zkratového proudu [3]

Indikátor se skládá ze dvou částí a sice vlastní jednotky IZP a tří měřících transformátorů proudu (SPT), jež jsou instalovány na jednotlivé fáze vedení a posílají měřený signál IZP. Dojde-li k překročení nastavení velikosti monitorovaného proudu fáze, a to nepřetržitě po nastavenou vybavovací dobu dojde k inicializaci indikačních prvků dané fáze. Napájení samotných IZP je provedeno buď přes nn soustavu nebo pomocí měřícího transformátoru, který odebírá energii z měřeného obvodu.

Pro zajištění správné funkce indikátoru se nutná kompenzace proudu procházejícího stíněním, proto se při zapojování SPT musí provléct všechna uzemněná stínění zpět skrz měřící transformátor. Při správném zapojení bude poté transformátor měřit pouze proud procházející jádrem kabelu.



Obr. 26: Správná a chybná instalace měřícího transformátoru proudu na kabelové vedení [3]

5.4 Lokalizace postižených vývodů

a) Odpínání úseků postiženého vývodu

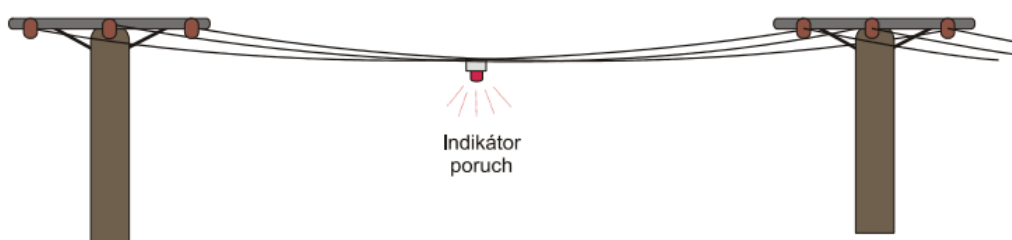
Jedná se o nejrozšířenější a nejužívanější způsob hledání postiženého vývodu u nás. Při této metodě dochází k postupnému odpínání jednotlivých částí nebo větví postiženého vývodu, dokud nedojde k vypnutí poruchy, čímž se určí místo této poruchy. Velkou nevýhodou této poruchy je její dispečerská náročnost, jelikož vyžaduje časté odstávky elektrické energie. Z důvodu této nevýhody je snaha tuto metodu postupně nahrazovat sofistikovanějšími metodami.

b) Spojování postiženého vývodu do kruhu

Jedná se o operativně jednodušší prostředek pro lokalizaci poruchy, kdy se spojením postiženého a nepostiženého vývodu do kruhu přerozdělí netočivé složky proudu na jejichž základě se provede výpočet místa poruchy. Propojení přípojnice do kruhu není vždy možné. Širšímu užití této metody také zamezuje homogenita parametrů vedení, kdy díky členitosti úseků s rozdílnými parametry a konfigurací je jen velmi obtížné někdy i nemožné vytvořit korektní model vedení. Přesnost lokalizace je také omezena nestálostí povětrnostních vlivů a ročního období.

c) Indikátory poruch venkovního vedení

Indikátory pracují na základě monitoringu netočivých složek napětí a proudu jednotlivých fází, kdy jsou schopny určit směr poruchy. Indikace poruchových stavů probíhá dle typu pomocí rozpínacího relé, optickou signalizací, dálkovou komunikací s dispečinkem nebo indikačními terčíky s magnetickou pamětí. Napájení indikátorů je zajištěno použitím fotovoltického článku, baterií nebo je k napájení použito samotné měřené vedení. Nevýhodou této metody je nízká citlivost. Výhodou jsou nižší pořizovací náklady, malé rozměry a snadná instalace bez nutnosti odpojení dodávky elektrické energie.



Obr. 27: Indikátor poruchy venkovního vedení [3]

6. Výpočet

6.1 Zemní spojení v kabelové síti

Provedte výpočet velikosti poruchového proudu v kabelové síti 22 kV a navrhnete a) odporník a b) tlumivku pro kompenzaci kapacitních proudů. Délka sítě je $l = 50$ km a druh použitého kabelu je 22-AXEKCY o průřezu 185 mm^2 .

Tab. 3: Katalogová data použitého kabelu [8]

22-AXEKCY 12,7/22 (25) kV

Technická data | Technical data



Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Průměr nad izolací (mm)	Celkový průměr (cca) (mm)	Váha (cca) (kg/100 m)	Standardní dodací délka (m)	Standardní velikost bubnu
Number of cores x cross-section of conductor (mm ²)	Diameter over insulation (mm)	Overall diameter (approx.) (mm)	Weight (approx.) (kg/100 m)	Standard delivery length (m)	Standard drum size
1 x 185/25	28,3	37	170	500	K16

Elektrická data při +20 °C | Electrical data at +20 °C

Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Odpor jádra max. (Ω/km)	Odpor stínění max. (Ω/km)	Indukčnost v troj- úhelníku/rovině* (mH/km)	Kapacita (μF/km)	Nabíjecí proud/fáze (A/km)
Number of cores x cross-section of conductor (mm ²)	Conductor resistance max. (Ω/km)	Screen resistance max. (Ω/km)	Inductance in trefoil/in plane* (mH/km)	Capacitance (μF/km)	Charging current/phase (A/km)
1 x 185/25	0,164	0,727	0,36/0,54	0,40	1,6

Kapacita kabelu vůči zemi:

$$C_k = 0,40 \text{ } \mu\text{F/km}$$

Celková kapacita sítě:

$$C = C_k * l = 0,40 * 50 = 20 \text{ } \mu\text{F}$$

Poruchový proud:

$$I_p = 3 * \omega * C * U_f = 3 * 2\pi * 50 * 20 * 10^{-6} * \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3}} = 239,42 \text{ A}$$

a) Návrh tlumivky

Velikost indukčnosti tlumivky:

$$L_{Tl} = \frac{1}{3 * \omega^2 * C} = \frac{1}{3 * (2\pi * 50)^2 * 20 * 10^{-6}} = 0,1688 \text{ H}$$

Ověření kompenzačního proudu tekoucího tlumivkou:

$$I_{Tl} = \frac{U_s}{\sqrt{3} * \omega * L_{Tl}} = \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3} * 2\pi * 50 * 0,1688} = 239,42 \text{ A}$$

Proud protékající tlumivkou se rovná proudu protékajícímu zemním spojením.

Výkon tlumivky:

$$S_{Tl} = I_p * U_f = 239,42 * \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3}} = 3,016 \text{ MVA}$$

b) Návrh odporníku

Velikost odporu odporníku:

$$R_N < \frac{1}{3 * \omega * C} = \frac{1}{3 * 2\pi * 50 * 20 * 10^{-6}} = 53,05 \text{ } \Omega$$

Z řady E12 vyberu hodnotu, $R_N = 47 \text{ } \Omega$

Ověření kompenzačního proudu tekoucím odporníkem:

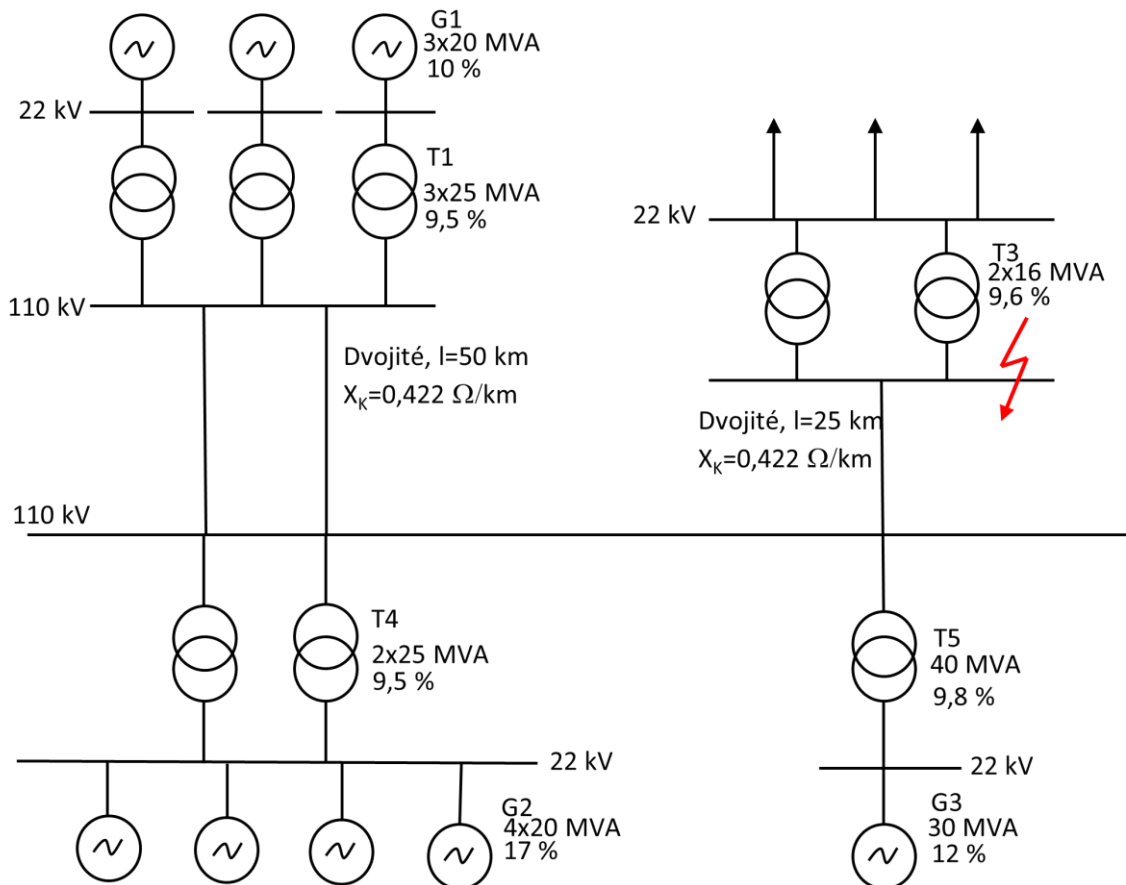
$$I_{RN} = \frac{U_f}{R_N} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 47} = 270,25 \text{ A}$$

$$I_{RN} > I_p \rightarrow 270,25 \text{ A} > 239,42 \text{ A}$$

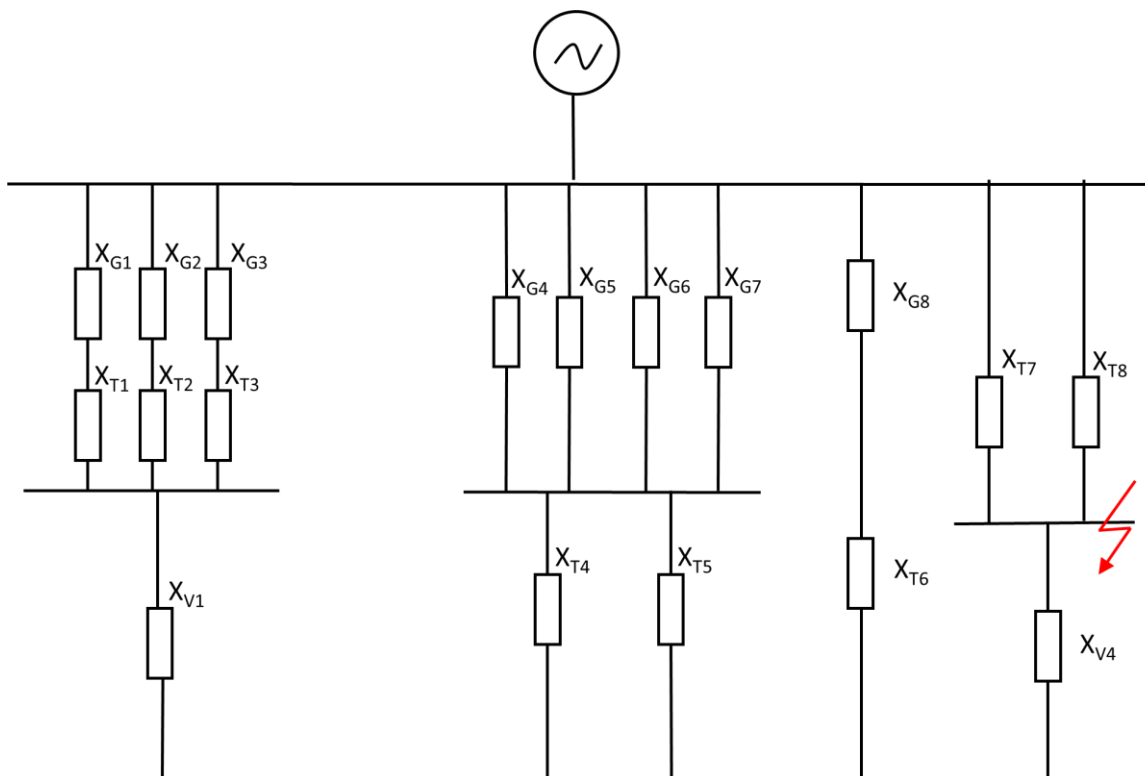
Proud protékající odporníkem je vyšší než proud zemního spojení, tudíž odporník vyhovuje.

6.2 Jednofázový zkrat

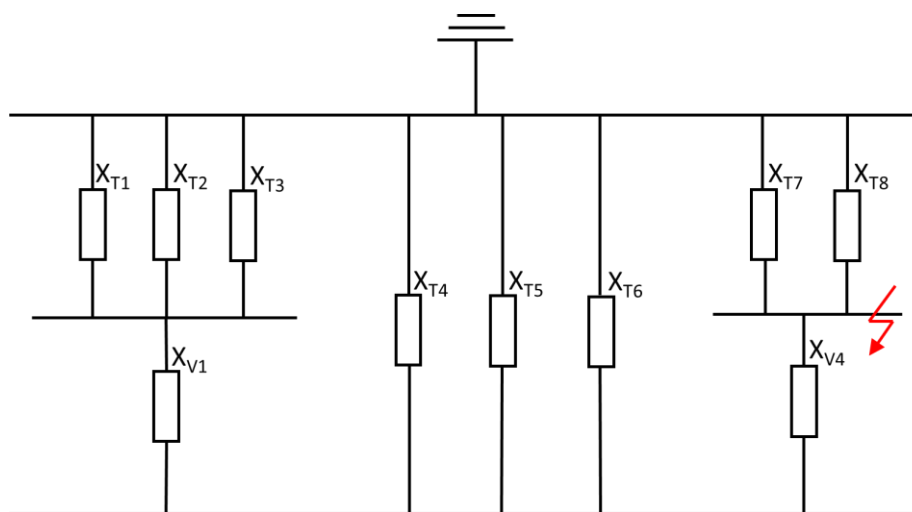
Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu I_k'' pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaném místě na schématu. Učiňte tak pro poměrné hodnoty. Vzažný výkon si zvolte $S_v = 100 \text{ MVA}$. Hodnoty jsou převzaty z tabulek v [7].



Obr. 28: Schéma řešené sítě



Obr. 29: Náhradní schéma sousledné a zpětné složky



Obr. 30: Náhradní schéma nulové složky

Sousledná a zpětná reaktance:

Zpětná reaktance všech složek obvodu je stejná jako reaktance sousledná.

Alternátory:

$$X_{G1(1)} = X_{G2(1)} = X_{G3(1)} = \frac{x''_{d1} * S_V}{S_{G1}} = \frac{0,1 * 100}{20} = 0,500$$

$$X_{G4(1)} = X_{G5(1)} = X_{G6(1)} = X_{G7(1)} = \frac{x''_{d4} * S_V}{S_{G4}} = \frac{0,17 * 100}{20} = 0,850$$

$$X_{G8(1)} = \frac{x''_{d8} * S_V}{S_{G8}} = \frac{0,12 * 100}{30} = 0,400$$

Transformátory:

$$X_{T1(1)} = X_{T2(1)} = X_{T3(1)} = \frac{u''_{k1} * S_V}{S_{T1}} = \frac{0,095 * 100}{25} = 0,380$$

$$X_{T4(1)} = X_{T5(1)} = \frac{u''_{k4} * S_V}{S_{T4}} = \frac{0,095 * 100}{25} = 0,380$$

$$X_{T6(1)} = \frac{u''_{k6} * S_V}{S_{T6}} = \frac{0,098 * 100}{40} = 0,245$$

$$X_{T7(1)} = X_{T8(1)} = \frac{u''_{k7} * S_V}{S_{T7}} = \frac{0,096 * 100}{16} = 0,600$$

Vedení (V1, V2-110kV, dvojité AlFe, průměr 150 mm², stožár typu Soudek):

$$X_{V1(1)} = x_k * l_1 * \frac{S_V}{2 * U_s^2} = 0,422 * 50 * \frac{100 * 10^6}{2 * (110 * 10^3)^2} = 0,087$$

$$X_{V2(1)} = x_k * l_2 * \frac{S_V}{2 * U_s^2} = 0,422 * 25 * \frac{100 * 10^6}{2 * (110 * 10^3)^2} = 0,044$$

Náhradní sousledná reaktance:

$$X_{(1)c} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{X_{G1}+X_{T1}} + \frac{1}{X_{G2}+X_{T2}} + \frac{1}{X_{G3}+X_{T3}}} + X_{V1}} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{X_{G4}+X_{G5}} + \frac{1}{X_{G6}+X_{G7}} + \frac{1}{X_{T4}+X_{T5}}} + \frac{1}{X_{G8}+X_{T6}}} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{X_{T7}+X_{T8}}} + X_{V4}} \right)^{-1}$$

$$X_{(1)c} = \left(\frac{1}{\frac{1}{0,500+0,380} + \frac{1}{0,500+0,380} + \frac{1}{0,500+0,380}} + 0,087 \right) + \frac{1}{\frac{1}{0,850} + \frac{1}{0,850} + \frac{1}{0,850} + \frac{1}{0,850} + \frac{1}{0,380} + \frac{1}{0,380}} + \frac{1}{0,400+0,400} + \frac{1}{\frac{1}{0,600} + \frac{1}{0,600}} + 0,044 \right)^{-1}$$

$$X_{(1)c} = X_{(2)c} = 0,012$$

Nulová reaktance:

Předpokladem je, že transformátory mají nulovou reaktanci stejnou jako souslednou, transformátory jsou na straně zkratu spojeny do hvězdy a jejich uzly jsou uzemněny.

Nulová reaktance vedení V1 a V2 (dvojité vedení 110 kV s AlFe zemnicím lanem):

$$X_{V1(0)} = 3 * X_{V1(1)} = 3 * 0,087 = 0,261$$

$$X_{V2(0)} = 3 * X_{V2(1)} = 3 * 0,044 = 0,132$$

Náhradní nulová reaktance:

$$X_{(0)c} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{X_{T1}} + \frac{1}{X_{T2}} + \frac{1}{X_{T3}}} + X_{V1}} + \frac{1}{X_{T4}} + \frac{1}{X_{T5}} + \frac{1}{X_{T6}} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{X_{T7}} + \frac{1}{X_{T8}}} + X_{V4}} \right)^{-1}$$

$$X_{(0)c} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{0,380} + \frac{1}{0,380} + \frac{1}{0,380}} + 0,261} + \frac{1}{0,380} + \frac{1}{0,380} + \frac{1}{0,245} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{0,600} + \frac{1}{0,600}} + 0,132} \right)^{-1}$$

$$X_{(0)c} = 0,07$$

Vztažený proud:

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} * U_s} = \frac{100}{\sqrt{3} * 110} = 0,525 \text{ kA}$$

Počáteční rázový zkratový proud:

$$I''_{k1} = \frac{c * 3 * I_V}{X_{(1)c} + X_{(2)c} + X_{(0)c}} = \frac{1,1 * 3 * 0,525}{0,012 + 0,012 + 0,07} = 18,431 \text{ kA}$$

7. Závěr

Stěžejní náplní bakalářské práce jsou poruchy, jež se za určitých okolností mohou objevit v elektrizačních sítích. Práce je zaměřena na poruchy kompenzovaných a izolovaných soustav, které mohou postihnout jednu fázi. Jedná se tedy především o zemní spojení a jednofázový zkrat. Zemní spojení nastává, když je zajištěno vodivé spojení jedné fáze se zemí. Musíme odlišovat zemní spojení od jednofázového zkratu, jelikož při jednofázovém zkratu je poruchový proud několikanásobně větší než provozní proud, a tudíž může napáchat škody, kdežto při zemním spojení je tento proud relativně malý a může být v některých případech i tolerován.

Součástí problematiky těchto poruch jsou i jejich kompenzace a lokalizace. Lokalizace poruch se provádí pomocí statických a dynamických metod. Nejčastěji používáme statické metody, jelikož na rozdíl od dynamických, které spočívají ve vyhodnocení poruchy v krátkém časovém okamžiku, můžeme statické metody používat, dokud nedojde k co nejpřesnější lokalizaci místa poruchy. Nejstarší, avšak stále používanou metodou je postupné odpojování úseků do doby než je porucha lokalizována. Postupně dochází k náhradě této metody za modernější, jež využívají statických metod a zároveň jsou schopny kompenzace poruchových proudů.

V praktické části jsem názorně vypočetl poruchový proud zemního spojení v síti 22 kV, včetně návrhu kompenzace pomocí tlumivky a odporníku. Následně jsem vypočítal počáteční poruchový proud jednofázového zkratu.

Literatura

- [1] HODINKA, M., FECKO, Š., NĚMEČEK, F. Přenos a rozvod elektrické energie. SNTL Praha 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [2] SANTARIUS P. Elektrické stanice a vedení. 2. vyd. VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0175-2
- [3] TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] KUČERA, D. Přenos a rozvod elektrické energie. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně 1982
- [5] Zemní spojení v trojfázových soustavách [online].
Dostupné z: Microsoft Word – Zemní spojení - text.doc
- [6] Materiál z přednášek – Přenos a rozvod elektrické energie
<http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/prenos_a_rozvod_elektricke_energie.htm>
- [7] Kabely pro vysoké napětí [online]. Dostupné z:
Dostupné z: <http://www.konex.sk/files/2015-04-29-140623-vn-katalog.pdf>
- [8] Vodiče pro venkovní vedení [online]. Dostupné z:
<https://www.vovcr.cz/odz/tech/283/page34.html>
- [9] Závěsný kabel [online]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/co-vite-o-pripojках-ze-zavesnych-kabelu-a-izolovanych-vodicu>
- [10] Overhead Line (OHL) Electrical Parameters [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z:
https://www.powerwiki.cz/attach/PPE/PPE_pr02_parametry.pdf